

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

# **Caracterización de lechos fluidizados con mezclas binarias de partículas**

Autor: Jaime Escolar Medina

Tutor: Jesús Gómez Hernández

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                      | <b>5</b>  |
| <b>RESUMEN .....</b>                               | <b>8</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                          | <b>9</b>  |
| 1.1    Antecedentes.....                           | 10        |
| 1.2    La segregación de partículas .....          | 13        |
| 1.3    Objetivo.....                               | 15        |
| 1.4    Entorno SOCIOECONÓMICO.....                 | 16        |
| 1.5    Marco regulador .....                       | 17        |
| <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>                  | <b>18</b> |
| 2.1    Clasificación de lechos .....               | 19        |
| 2.2    Propiedades de los lechos fluidizados ..... | 21        |
| 2.3    Regímenes de fluidización.....              | 23        |
| 2.4    Clasificación Geldart.....                  | 26        |
| 2.5    Aplicaciones industriales.....              | 28        |
| <b>METODOLOGÍA.....</b>                            | <b>31</b> |
| 3.1    Descripción del sistema experimental .....  | 32        |
| 3.2    Estudio de granulometría.....               | 36        |
| 3.3    Descripción de los ensayos.....             | 38        |
| <b>TRATAMIENTO DE SEÑALES.....</b>                 | <b>40</b> |
| 4.1    Teorema de Nyquist.....                     | 41        |
| 4.2    Desviación típica .....                     | 42        |
| 4.3    Densidad espectral-periodograma .....       | 44        |
| <b>RESULTADOS .....</b>                            | <b>45</b> |
| 5.1    Boxplot de los flujos.....                  | 46        |
| 5.2    PSD de Presiones .....                      | 50        |
| 5.3    PSD de acelerometría.....                   | 57        |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>CONCLUSIONES.....</b> | <b>61</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b> | <b>62</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1: Esquema de lecho fluidizado .....   | 11 |
| Fig. : Segregación de partículas.....   | 14 |
| Fig. 3: Transporte neumático al exterior .....  | 20 |
| Fig. 4: Tipos de fluidización (Kunii 1991) .....  | 23 |
| Fig. 5: Fluidización turbulenta.....  | 25 |
| Fig. 6: Gráfico para la clasificación de Geldart (Kunii 1991) .....   | 26 |
| Fig. 7: Proceso Winkler (izquierda) y Craqueo catalítico (izquierda) (Kunii 1991) .....   | 29 |
| Fig. 8: Intercambiador de contacto directo (izquierda), calentamiento de aire (centro) y recuperación de calor de cenizas (derecha) (Kunii 1991)..... | 30 |
| Fig. 9: Sistema completo: Lecho, sensores, caudalímetro y ordenador .....   | 32 |
| Fig. 10: Caudalímetro .....   | 33 |
| Fig. 11: Diagrama del lecho y sensores .....  | 34 |
| Fig. 12: Display de sensores.....   | 35 |
| Fig. 13: Funcionamiento del programa Labview de toma de datos .....   | 35 |
| Fig. 14: Tamizado .....   | 36 |
| Fig. 15: Efecto del golpe de la puerta en Labview.....  | 38 |
| Fig. 16: Esquema del procedimiento de experimentos.....   | 39 |
| Fig. 17: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 100% partículas gruesas.....   | 46 |
| Fig. 18: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 75% partículas gruesas y 25% finas .....   | 47 |
| Fig. 19: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 50% partículas gruesas y 50% finas .....   | 47 |
| Fig. 20: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 50% partículas gruesas y 50% finas .....   | 48 |
| Fig. 21: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 100% partículas finas .....  | 48 |
| Fig. 22: Comparativa de Boxplots.....   | 49 |
| Fig. 23: Comparativa de PSD de presiones a 40l/min en el plenum .....   | 51 |
| Fig. 24: Comparativa de PSD de presiones a 100l/min en el plenum .....  | 52 |
| Fig. 25: Comparativa de PSD de presiones a 200l/min en el plenum .....  | 53 |
| Fig. 26: Comparativa de PSD de presiones a 40l/min en el lecho.....   | 54 |
| Fig. 27: Comparativa de PSD de presiones a 200l/min en el lecho.....  | 55 |
| Fig. 28: Comparativa de PSD de presiones a 200l/min en el lecho .....   | 56 |
| Fig. 29: Efecto de la vibración de la estructura en las PSD de acelerometría.....   | 57 |
| Fig. 30: Comparativa de PSD de acelerometría a 40l/min.....   | 58 |
| Fig. 31: Comparativa de PSD de acelerometría a 100l/min.....  | 59 |

Fig. 32: Comparativa de PSD de acelerometría a 200l/min.....60

## RESUMEN

El lecho fluidizado es un dispositivo en el cual se utiliza el fenómeno de la fluidización para aprovechar las características únicas que derivan de su comportamiento en un reactor químico. Esto ha provocado que su puesta en marcha en aplicaciones a escala industrial suponga ventajas en los procesos en los que sirve de recipiente.

Como en cualquier campo de la ingeniería, el funcionamiento ideal dista mucho de las condiciones reales por lo que surgen complicaciones a las que dar solución. Por ello se hace importante conocer el comportamiento interno del lecho.

Este TFG se centra en caracterizar la composición de un lecho fluidizado en diversas condiciones de flujo de aire, de fluidización y de composición en las diferentes mezclas binarias ensayadas.

El método empleado para ello es la experimentación en un dispositivo físico y la toma de datos siguiendo un procedimiento fiable. Posteriormente se transforman los fenómenos físicos en señales eléctricas por medio de sensores y se relacionan estas medidas con el comportamiento de las mezclas mediante herramientas de software y matemáticas.



# INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

En los procesos en los que entra en juego el contacto entre diversas sustancias que reaccionan entre ellas, es vital asegurar el mejor contacto posible. Esto significa que el contacto entre los reactivos sea lo más homogéneo posible, que no haya superficies en las que las partículas superiores bloqueen el contacto de las inferiores ya que de esta manera se empeora la calidad y eficiencia del reactor. Existen diferentes métodos para garantizar la homogeneidad del contacto entre partículas como el lecho fijo, el lecho rotatorio, el agitado, el removido con palas, y el lecho fluidizado.

Un lecho fluidizado es un dispositivo, generalmente cilíndrico, cuya geometría puede ir desde paredes verticales hasta lechos compuestos por combinación de otros simples en diversas configuraciones según sea necesario para su propósito: serie, paralelo o cascada, entre otros.

Contiene una masa de partículas sólidas y una boquilla en su base, pudiendo ser ésta última fija o móvil, por donde se fuerza circular un fluido que, al pasar a través de las partículas, las acelera. Si la velocidad del flujo de aire pasa de un valor mínimo, directamente proporcional al tamaño de las partículas, se produce el fenómeno conocido como fluidización: el conjunto de partículas sólidas adquiere propiedades de un fluido sin perder las propias de sólido, lo que genera una combinación de características que abre nuevas e interesantes posibilidades para la puesta en práctica en aplicaciones industriales.

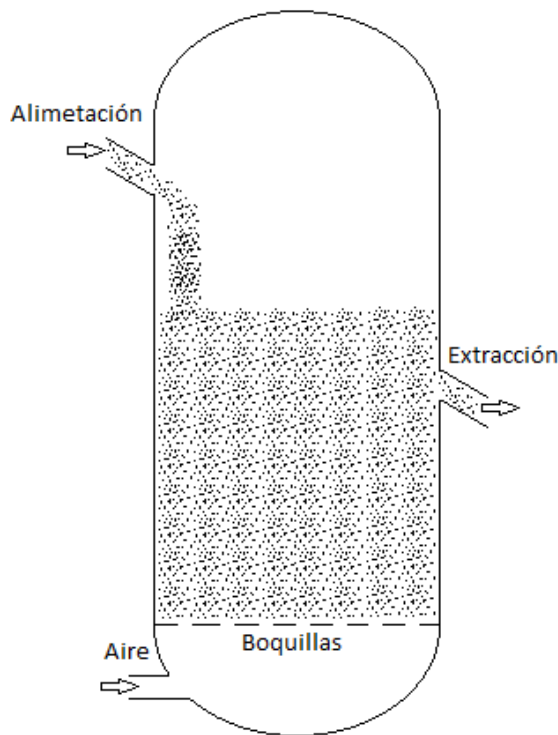


Fig. 1: Esquema de lecho fluidizado

Uno de los principales retos de cualquier instalación que se centra en la ingeniería de procesos es conseguir una operación óptima, lo que en lechos fluidizados significa lograr una composición homogénea de partículas, ya que éstas pueden tener diferentes densidades o tamaños.

Sobre este aspecto se ha investigado para encontrar métodos de monitorización para poder prever problemas como la oclusión de las boquillas por las partículas, especialmente por la cohesión de éstas en ambientes húmedos. Otro problema es la desfluidización del lecho debido al aumento de tamaño de las partículas (ya que la velocidad mínima es dependiente de este dato, si el diámetro aumenta a la misma velocidad, puede perder su estado fluidizado).

También hay que tener en cuenta la segregación de partículas que ocurre debido a que raramente en un lecho hay partículas del mismo tamaño y densidad, por lo tanto, la fluidización conjunta y homogénea es difícil de lograr ya que, con la misma velocidad del fluido, estas partículas tienen diferentes comportamientos.

En la actualidad, los métodos que mejor funcionan para la monitorización son en los que se extrae una muestra del interior, sea mediante una trampilla accionada periódicamente o mediante la extracción continua por un conducto. La simpleza y la muestra física del interior son las principales ventajas, pero este tipo de medidas conllevan irregularidades en el proceso, derivadas de la necesidad de la extracción de elementos del lecho, potencialmente alterando su composición y estado de fluidización, así como una pérdida de la eficiencia global. Las mediciones con sensores para conocer su comportamiento en tiempo real solventarían estos inconvenientes, si fueran capaces de dar datos relevantes con los fenómenos físicos que ocurren en el interior.

## 1.2 LA SEGREGACIÓN DE PARTÍCULAS

Como anteriormente se ha comentado, un fenómeno secundario generalmente indeseable asociado a la operación de lechos fluidizados es la segregación, que sucede cuando el tamaño de las partículas que lo componen no es homogéneo.

Cuando grupos de partículas con diferente densidad o tamaño son fluidizados, se segregan en un modo característico. La parte superior del lecho tiene una composición uniforme mientras que los componentes que tienden a caer (más densos o más grandes) forman una capa concentrada en el fondo. (Nienow 1978)

Un ejemplo es el caso de mezclas binarias, en la que dos grupos de partículas se encuentran fluidizados teniendo diferentes tamaños. Esto puede ocurrir por la composición requerida de la mezcla por el proceso o como consecuencia de reacciones internas que alteran el diámetro de algunas de éstas, como puede ser la creación de ceniza a partir de gránulos de carbón en lechos de combustión, entre otros ejemplos.

En mezclas de cualquier tipo, la velocidad mínima de fluidización es la mínima de cualquiera de las partículas, pero esto no significa que todo el lecho se vaya a fluidizar, y si lo hace, puede no ser homogéneamente. A velocidades superiores pero cercanas a la mínima se puede fluidizar el grupo de partículas de menor tamaño permaneciendo estáticas las de mayor tamaño, ya que el aire pasará a través de ellas sin fluidizarlas.

Otro caso posible es que se encuentren en diferentes estados de fluidización y la segregación ocurre entre dos grupos de partículas fluidizados, uno encima del otro, lo que significa que un lecho puede estar bien fluidizado en el sentido que todo el conjunto es elevado completamente por un fluido, pero puede estar segregado siendo la composición local en los estratos formados diferente de la composición media del conjunto. En sistemas binarios, la mezcla completamente homogénea sólo se puede conseguir bajo ciertas condiciones. (Wu 1998)

Todo esto conlleva que la calidad de proceso sea menor, por lo tanto, actuar antes de que se produzca es importante y con una monitorización con sensores se podrían lograr medidas continuas e instantáneas.

Esta imagen de los experimentos ilustra un caso de segregación, la composición de la mezcla es 75% de partículas gruesas y 25% de finas (% en masa), a 20 l/min. Se puede apreciar cómo el aire meramente percola a través de la zona de gruesas (no es suficiente para fluidizarlas) y fluidiza la capa superior de partículas finas:



*Fig. 2: Segregación de partículas*

### 1.3 OBJETIVO

Este proyecto tiene como objetivo caracterizar la composición de una mezcla binaria de partículas en un lecho fluidizado por medio de la medición de la presión manométrica y de la acelerometría.

Se han usado sensores que aprovechan el efecto piezoeléctrico, bien creado por la vibración debida al funcionamiento del lecho (acelerometría), bien por la diferencia de presión debida al burbujeo de las partículas (presión). Se genera una señal eléctrica que es interpretada por medio del software Labview, que permite la toma de datos de estas señales en condiciones prefijadas por el usuario y crea archivos con éstas. Posteriormente se hace un tratamiento con el programa MATLAB mediante la comparación de la desviación media (íntimamente ligada al estado de fluidización) en diferentes regímenes para varias composiciones, y la estimación de Welch de la *Power Spectral Density*, PSD. Así, con diferentes dosados de la mezcla, se busca extraer una correlación entre las desviaciones típicas y PSD obtenidas y el estado de fluidización y composición.

Este método permitiría:

- Relacionar con precisión las lecturas de desviaciones medias de las señales con el estado de fluidización. Haciendo posible la monitorización de este estado en futuras implementaciones.
- Un control continuo, con lo que no sería necesaria una extracción cíclica de muestras del lecho para conocer su composición media, sino que se dispondrían de estos datos sin necesidad de otras operaciones.
- Un control en tiempo real, los datos obtenidos de modo continuo serían reales en el instante de la toma de los mismos, haciendo más fáciles las actuaciones en la operación del lecho ya que no hay lapso entre medida y visualización.

## 1.4 ENTORNO SOCIOECONÓMICO

El impacto de este proyecto en la industria de lechos fluidizados deriva de las mejoras al control y a la operación del proceso.

Desde el punto de vista económico, al evitar la retirada de partículas para su análisis se evita la pérdida de potenciales productos, para los que ya se había empleado recursos como combustible o recubrimiento para transformarlos y al extraerlos, esa parte se pierde. Por lo tanto, el gasto en recursos sería menor.

En cuanto al impacto medioambiental con el ahorro de combustible o energía eléctrica para el funcionamiento, se reducirían las emisiones derivadas de la operación.

Desde el punto de vista técnico, un mejor control general posibilitaría implementaciones en las que se necesitan condiciones más complejas que difícilmente son producidas sin la suficiente monitorización, haciendo así, progresar la tecnología y el número de procesos factibles en un lecho fluidizado.

El sistema empleado en el laboratorio era sencillo: dos sensores para acelerometría y dos para presión, cableado hasta las placas electrónicas y conexión al ordenador. El coste de un sistema de estas características sería:

| Elemento                | Precio unitario | Cantidad | Subtotal |
|-------------------------|-----------------|----------|----------|
| Sensor de acelerometría | 6000€           | 2        | 12000€   |
| Sensor de presión       | 600€            | 2        | 1200€    |
| FPGA                    | 200€            | 2        | 400€     |
| Cableado                | 10€*            | -        | 10€      |
| Diseño y montaje        | 1000 €*         | -        | 1000€    |
|                         |                 | Total    | 14610€   |

\*Estimado para una instalación real, en la del laboratorio el coste fue 0.

Debido a que ésta era una fase experimental en una instalación proporcionalmente pequeña comparada con las de carácter industrial, la elaboración de un presupuesto puede no ser precisa para una futura puesta en práctica en la industria, debiendo tener en cuenta la escalabilidad de los costes.



## 1.5 MARCO REGULADOR

Los lechos fluidizados son dispositivos seguros que no implican riesgos intrínsecos más allá de los de cualquier instalación industrial, la regulación en la materia de riesgos y responsabilidades será la misma que en cualquier otra instalación (medidas de protección, señalización en caso de emergencia etc).

Los estándares del proyecto son relativos al modo empleado para la toma de datos y su tratamiento (discutido en puntos posteriores), se usan dos programas específicos para estos propósitos: Labview para la toma y MATLAB para el procesamiento, aunque no son estrictamente necesarios, sino que se han usado por su adecuación técnica a los procedimientos seguidos.

En cuanto a propiedad individual y posibles patentes, si bien este proyecto se centra en un ámbito sobre los lechos fluidizados relativamente poco explorado en la técnica, que podría en un futuro producir avances reales, no desarrolla un procedimiento de análisis tan exhaustivo y preciso como para poder conseguir un método sujeto a legislación de propiedad intelectual o patente.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 2.1 CLASIFICACIÓN DE LECHOS

En la fluidización de un lecho se tienen que tener en cuenta varios factores: el diámetro de la instalación, el diámetro de las partículas y la velocidad del flujo inyectado.

La clasificación se hará en base a estos factores y como para este trabajo se va a usar la misma instalación y solamente dos tipos de partículas, que a su vez serán ensayadas tanto mezcladas como por separado. Por eso el dato de mayor importancia para clasificarlos es el flujo de aire, que determina la velocidad en el interior del lecho, siendo el cociente del flujo volumétrico y el área transversal.

Esta velocidad se va incrementando para pasar por las diferentes etapas de un lecho: fijo, expandido y fluidizado.

Haciendo a un fluido atravesar una capa de cierto grosor (un lecho) de partículas relativamente finas a velocidad baja, el fluido simplemente pasará a través de los pequeños huecos entre éstas, creando un *lecho fijo*.

Al incrementar su velocidad, las fuerzas de fricción en la superficie de las partículas con el aire se acercarán al orden de magnitud de las fuerzas másicas que las empujan hacia abajo creando un aumento aparente de volumen, pero sin movimiento interno, generando un *lecho expandido*.

Con un sucesivo aumento de velocidad, la diferencia entre la fricción con el aire insuflado y la gravedad puede ser temporalmente positiva haciendo que alguna partícula pueda alzarse, permitiendo el paso de más fluido y disminuyendo su velocidad, causando una disminución en la fricción y volviendo a bajar. Este proceso aplicado a un gran número de partículas hace imposible su estabilización por lo que las partículas vibran y cambian de posición dentro del lecho continuamente, se dispone ahora de un *lecho fluidizado*.

Con un posterior incremento de velocidad del fluido, se alcanza la velocidad terminal de las partículas, la fuerza de fricción es lo suficientemente grande como para elevar las partículas y cargar con ellas siendo siempre superior a la fuerza gravitatoria, por lo tanto, se produce transporte en la dirección en la que circule el fluido llamado *transporte neumático*.



*Fig. 3: Transporte neumático al exterior*

Por esta clasificación, un dato primordial para la caracterización es la velocidad mínima a la que se produce fluidización, denominada  $v_{mf}$  que en este proyecto se intentará averiguar sobre los resultados obtenidos de desviaciones típicas y PSD para las diferentes composiciones ensayadas.

## 2.2 PROPIEDADES DE LOS LECHOS FLUIDIZADOS

El principal atractivo de este tipo de lecho es que adquiere las propiedades típicas de un fluido. Por ejemplo, si se dispone de un lecho fluidizado y se inclina, su superficie libre se inclinará en el mismo ángulo, o si se conectan dos lechos en el mismo estado de fluidización y diferente altura, las partículas fluirán a través de la conexión hasta compensar dicha diferencia.

Estas propiedades le dan desde el punto de vista industrial ciertas ventajas:

- La cantidad de intercambio de calor por unidad de volumen de instalación al coincidir: una gran superficie específica por unidad de volumen, ya que el fluido golpea prácticamente a todas las partículas a contracorriente y la alta conductividad térmica  $k$  de las partículas al ser sólidas, en comparación con las de los gases y líquidos.
- El flujo de partículas crea un mezclado continuo, lo cual permite monitorización fiable de todo el conjunto ya que, debido a la gran movilidad de las partículas, una muestra extraída de cualquier parte es representativa del conjunto.
- El rápido mezclado y gran volumen de sólidos absorbe fácilmente picos de temperatura disminuyendo el efecto transitorio y haciendo la operación del dispositivo más simple. En especial para lechos usados como reactores que no tienen funcionamiento continuo, reduciendo su puesta en marcha.
- La circulación de partículas hace posible la alimentación o retirado continuo y sencillo de cierta cantidad por una tubería auxiliar o que se encadenen varias etapas en diferentes lechos. De esta manera el proceso es más versátil y tiene la posibilidad de realizar diferentes operaciones con los mismos dispositivos cambiando solamente la configuración de éstos.

También se derivan inconvenientes a vencer:

- El proceso de entrada y salida continua de partículas unido a la rápida mezcla de los sólidos genera unos tiempos de residencia en el interior no uniformes, haciendo difícil un cálculo preciso de los productos de la reacción.
- El flujo de partículas sólidas es inevitable que golpee las paredes del lecho y conducciones si las hubiere, creando un efecto abrasivo y consecuente deterioro del material de contención.
- En presencia de humedad o cualquier otro tipo de condiciones como alta temperatura, se pueden generar aglomeraciones que causen diferente granulometría, haciendo el proceso menos uniforme o creando oclusiones en las conducciones. Ésta es una de las motivaciones para realizar la caracterización de partículas, para controlar el nivel de gránulos aglomerados y bajar la temperatura del reactor para disminuir su concentración cuando sea necesario.

## 2.3 REGÍMENES DE FLUIDIZACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, la velocidad del flujo del fluido determina el estado del lecho. Centrándose en la fluidización, a partir de  $v_{mf}$ , se pueden diferenciar varios grupos con el ascenso de la velocidad hasta llegar a la velocidad terminal en la cual se pasaría a transporte neumático, haciendo así una clasificación de lechos con diferentes propiedades, especialmente en lo referente al contacto fluido-sólido.

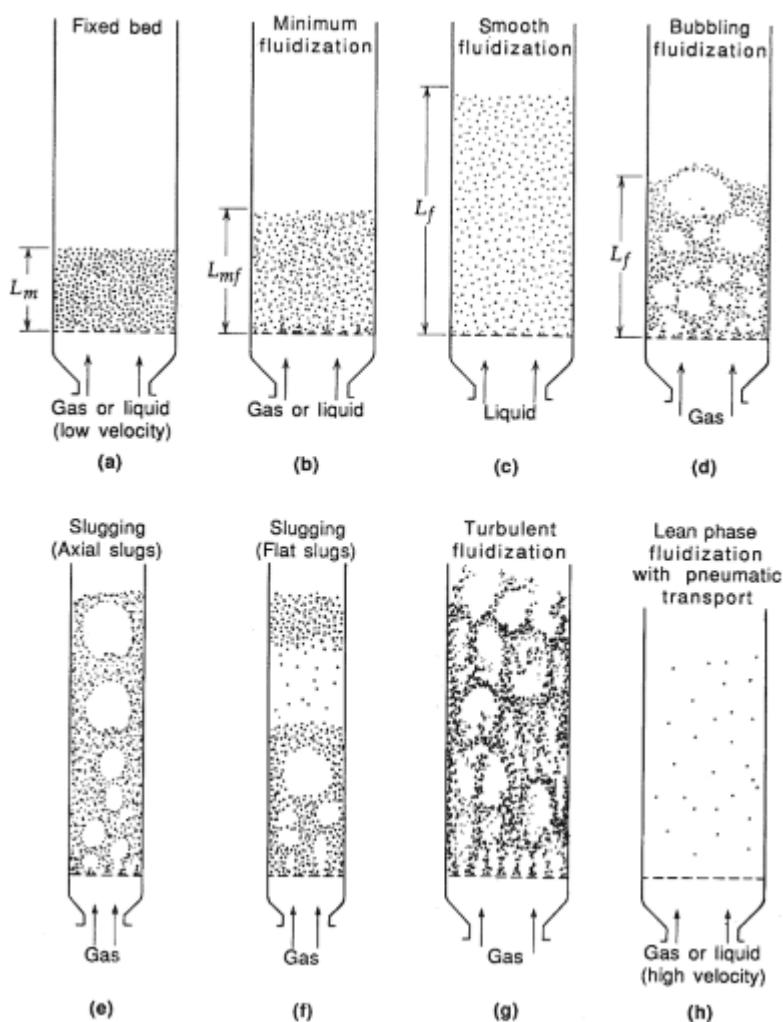


Fig. 4: Tipos de fluidización (Kunii 1991)

- Fluidización suave: en este estado las partículas están distribuidas uniformemente en el lecho, el fluido atraviesa el lecho de igual manera por todos los espacios.
- Burbujeo: al aumentar la velocidad se generan descompensaciones en las trayectorias que encuentra el fluido a su paso que generan acumulaciones de aire en forma de burbujas, las cuales consiguen vencer el peso de las partículas por encima de ellas y ascienden hasta la superficie.
- Golpeo (slugging) axial: al incrementar el flujo del aire, el tamaño de las burbujas aumenta haciendo que éstas se unan, generando un ciclo de subida de una sola burbuja que ocupa casi todo el diámetro del lecho mientras las partículas bajan pegadas a la superficie. Al aproximarse al punto más alto del lecho la burbuja colapsa y el aire escapa, generándose una burbuja en el mismo punto en el que se generó la primera y completando el ciclo.
- Golpeo plano: sucesivamente, a más velocidad, esta burbuja aumenta hasta ocupar todo el diámetro del lecho, funcionando como un pistón donde las partículas caen en forma de “lluvia” mientras la bolsa de aire se eleva, colapsando de igual manera en la superficie superior del lecho y repitiendo el ciclo con la formación de una nueva bolsa de aire en la parte inferior.
- Fluidización turbulenta: en el último estado de fluidización la velocidad es tan alta que apenas encuentra oposición por parte de las partículas.





*Fig. 5: Fluidización turbulenta*

## 2.4 CLASIFICACIÓN GELDART

Un dato determinante en el estudio de la fluidización es la geometría de las partículas, ya que su interacción con el fluido depende de su forma y tamaño

- En cuanto a su geometría son partículas de tipo ballotini, y considerando su esfericidad  $\psi$  como:

$$\bullet \quad \psi = \frac{A_{\text{esfera}}}{A_{\text{partícula}}} = 1$$

Entonces se pueden considerar prácticamente esféricas, luego la única componente que cambia es su diámetro  $d_p$ .

- En cuanto al tamaño y al peso, ya que éstas están compuestas del mismo material, vidrio, tienen la misma densidad, en torno a  $2500 \text{ kg/m}^3$  ( $2,5 \text{ g/mm}^3$ ), luego las de mayor radio tendrán más peso y serán fluidizadas a una velocidad superior.

Dentro de la fluidización no hay un único tipo, sino que dependiendo de estos dos factores se puede predecir qué forma tendrá; para ello se creó la clasificación Geldart

Según la clasificación Geldart existen 4 grupos; de menor a mayor tamaño son:

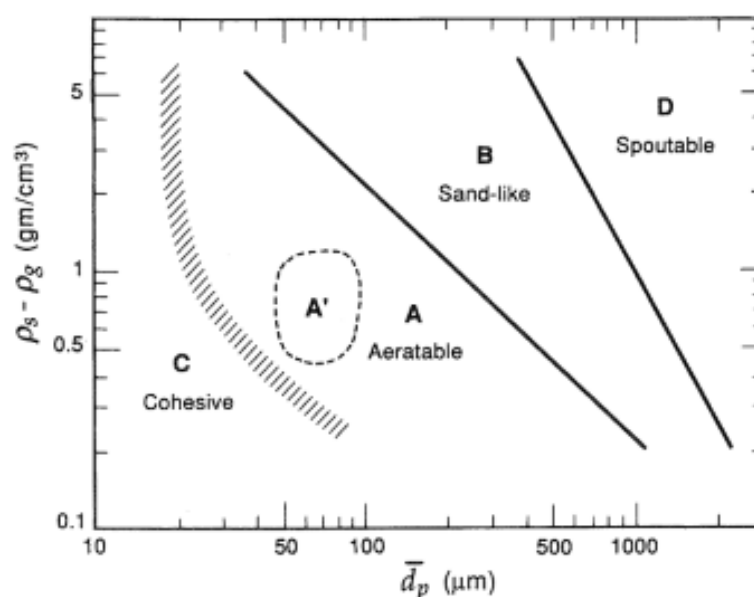


Fig. 6: Gráfico para la clasificación de Geldart (Kunii 1991)

- Grupo **C**: cohesivo o polvo muy fino, la fluidización es raramente alcanzable porque las fuerzas entre partículas son mayores que la acción del gas.

En lechos estrechos al elevarse por acción del fluido lo hacen como un conjunto, mientras que en lechos de mayor diámetro generan canales por los que circula el fluido sin producir fluidización. Una manera de evitarlo es procesarlas en una mezcla binaria con otros tipos más grandes, preferiblemente del grupo B.

- Grupo **A**: aireables, materiales con un pequeño tamaño o baja densidad, este grupo se fluidiza fácilmente de manera suave o con pequeño burbujeo controlado.

Las burbujas de aire que se generan se elevan más rápido que el resto del gas que percola a través de los sólidos, al incrementar su altura dentro del lecho se separan y desaparecen.

- Grupo **B**: arenosos, con un diámetro de partícula  $40\mu\text{m} < d_p < 500\mu\text{m}$ , este grupo fluidiza bien con burbujeo intenso de gran tamaño de partículas.

En este tipo el burbujeo se genera nada más superar la velocidad de mínima fluidización  $v_{mf}$ , se generan pequeñas burbujas que desaparecen al elevarse, se elevan más despacio que el resto del aire que atraviesa el lecho.

- Grupo **D**: con tendencia a generar chorros, partículas de gran tamaño o densidad. Los lechos profundos de este tipo son difíciles de fluidizar, con un comportamiento errático, abriéndose grandes canales de circulación fluido y explosiones de burbujas. La gasificación de carbón o el quemado de menas de metal se encuadran en este tipo y se procesan en lechos de poca profundidad.

Una gran cantidad de aire es necesaria para fluidizar este tipo de partículas, lo que produce comportamientos de pistón que generan chorros al llegar a la cima. Ésto se evita haciendo la sección aumentar a lo largo de su altura.

En el caso concreto de la mezcla binaria se usarán para las partículas finas diámetros de entre 150-250 $\mu\text{m}$  y para las gruesas de entre 600-800 $\mu\text{m}$  (más adelante se hace un estudio granulométrico más preciso). Por lo tanto, con la densidad y su diámetro podemos comprobar que, según esta clasificación, ambas se encuentran en los límites inferior y superior respectivamente del grupo B, arenosos.

## 2.5 APLICACIONES INDUSTRIALES

Las posibilidades que surgen de esa mezcla de propiedades generan múltiples aplicaciones, casi en su totalidad en la ingeniería de procesos, donde la uniformidad de la reacción es clave, también donde se aprovecha la gran capacidad de flujo térmico o la movilidad interna de las partículas.

### Procesos químicos: hidrocarburos y síntesis

Su enorme uniformidad térmica ha hecho al lecho fluidizado un proceso que ha ido incrementando su uso a lo largo del tiempo, para reacciones muy exotérmicas o sensibles a gradientes de temperatura.

Este sistema se ha utilizado desde el 1926 cuando Winkler desarrolló el primer lecho fluidizado a gran escala con objetivos comerciales. Su cometido era la gasificación del carbón produciendo monóxido de carbono e hidrógeno a partir de carbón insuflado con oxígeno y vapor de agua. Con la popularización del uso de combustibles líquidos este tipo de reactores han sustituido su combustible por derivados del petróleo.

Debido al enfrentamiento de EE.UU. con Japón en la segunda guerra mundial, surgió la necesidad de gasolina de alto octanaje para aviones, por lo que la mejora de procesos de síntesis del keroseno y gasoil llevó a la mejora del proceso Houdry, que implicaba lechos fijos con el consecuente peor contacto de los reactivos y necesidad de una gran cantidad de pellets. Para la optimización del consumo de materias primas se usó la fluidización creando el proceso de craqueo catalítico Thermoform (TCC por sus siglas en inglés). Una siguiente mejora del proceso por la empresa Standard Oil consiguió un sistema puramente neumático y estable, el craqueo catalítico fluido (FCC).

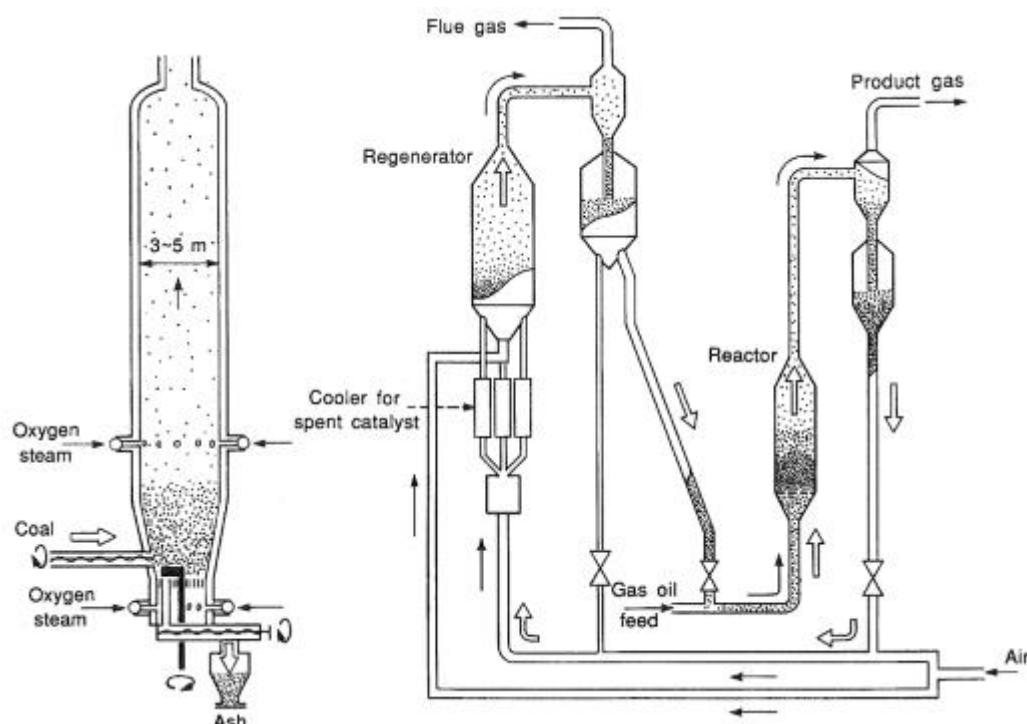


Fig. 7: Proceso Winkler (izquierda) y Craqueo catalítico (izquierda) (Kunii 1991)

A mediados de 1940 comenzó el uso de lechos fluidizados para la reacción Fischer-Tropsch, que conseguía gasolina de alto octanaje a partir del gas natural, abundante y barato en esa época. Debido a la imprevista baja eficiencia y al incremento del precio del gas natural esta práctica ha quedado en desuso salvo en Sudáfrica donde mediante lechos más rápidos, se logran mejores resultados.

Dejando aparte los hidrocarburos, el lecho fluidizado también se usa en otras reacciones de síntesis como la polimerización del monómero etileno gaseoso en polietileno, el plástico más usado actualmente, o la de silicio de gran pureza, con una demanda siempre creciente en la industria electrónica.

En cuanto a la metalurgia, el lecho fluidizado también ha demostrado su potencial en procesos como el horneado de arsenofita para obtener subproductos usados en la purificación del oro. En el mismo campo del horneado de menas, la compañía BASF creó hornos para la industria del ácido

sulfúrico, el más producido comercialmente. Estos hornos también son útiles en el quemado de piedra caliza, ahorrando así combustible.

#### Procesos físicos: intercambiadores de calor y solidificación/secado

Los lechos fluidizados han sido ampliamente utilizados en el intercambio de calor gracias a la gran cantidad que son capaces de transportar y su estabilidad térmica. Por ejemplo, en el enfriado de metales a una cierta temperatura para obtener las propiedades de una aleación o la recuperación de energía térmica aprovechando el calor de las cenizas de un horno para obtener agua o aire calientes.

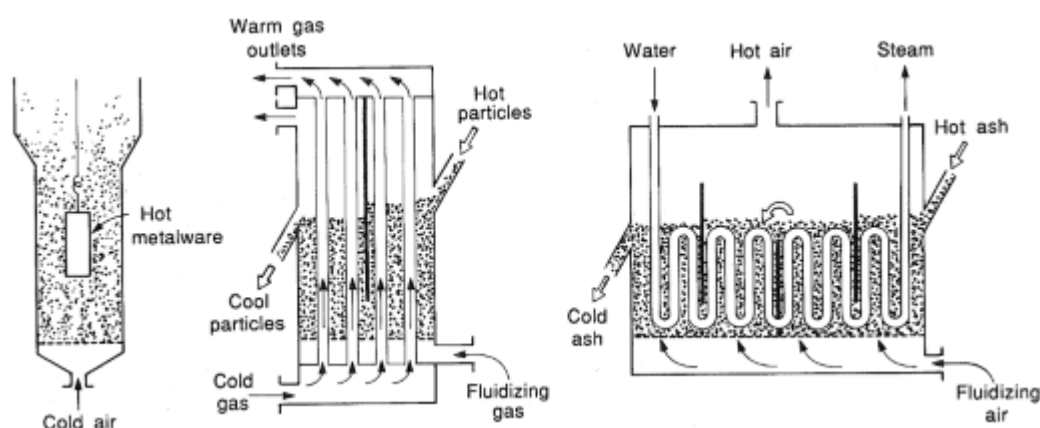


Fig. 8: Intercambiador de contacto directo (izquierda), calentamiento de aire (centro) y recuperación de calor de cenizas (derecha) (Kunii 1991)

En cuanto a la solidificación o el secado de masas fundidas o lodos, el lecho fluidizado es perfecto, ya que con el flujo cruzado a contracorriente favorece tanto la evacuación del calor como fuerza la evaporación del agua, separando, además, los gránulos formados tras los procesos y facilitando una retirada de los mismos.

En cuanto al recubrimiento de sólidos a partir de una masa líquida, gracias a la gran movilidad de las partículas dentro del lecho son fáciles los tratamientos de superficie como, por ejemplo, bolas de rodamientos que se recubren de materiales más resistentes al desgaste, pero costosos.

## METODOLOGÍA

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

La experimentación se llevó a cabo en una instalación física del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la universidad, un lecho de polimetilmetacrilato transparente para que se pudiera observar lo que sucedía en su interior.



*Fig. 9: Sistema completo: Lecho, sensores, caudalímetro y ordenador*

El fluido inyectado es el aire, proveniente de la línea general de la universidad. Para poder llevar a cabo los experimentos con control y probar diversas velocidades se usó un caudalímetro:





Fig. 10: Caudalímetro

Se dispusieron cuatro sensores: dos sensores de acelerometría por efecto piezoeléctrico en la parte delantera y la trasera del lecho, así como dos tomas de aire que conectaban con sensores de presión, uno de ellos situado en el plenum (parte inferior) y otro aproximadamente en la mitad del lecho. Cabe señalar que se esperan lecturas mayores en el primero debido a la pérdida de carga causada por el lecho.

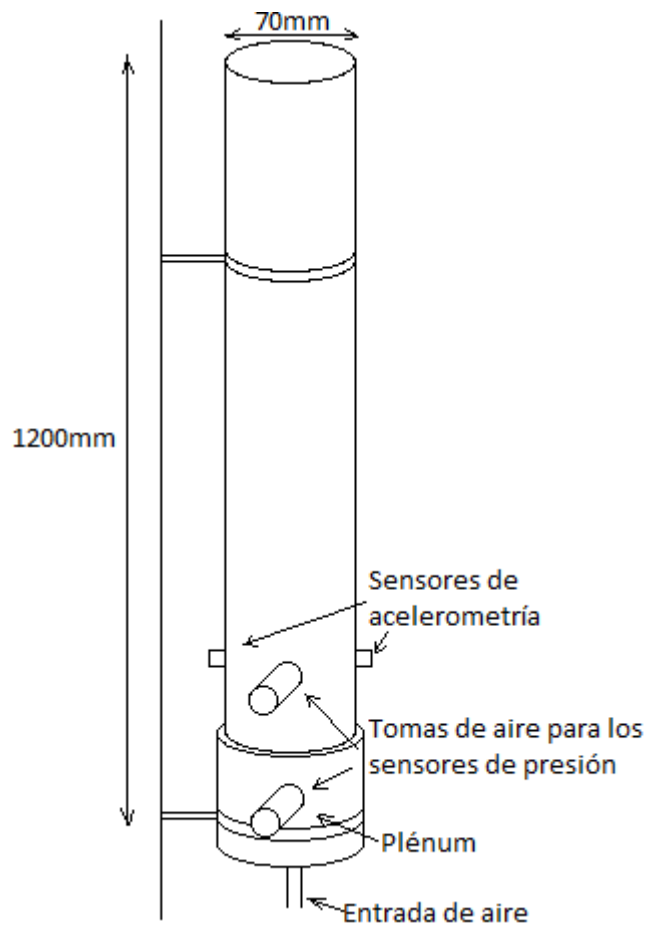


Fig. 11: Diagrama del lecho y sensores



Fig. 12: Display de sensores

Estos sensores generaban una señal que era traducida por las tarjetas electrónicas y en el ordenador mediante el programa y se podían generar archivos para trabajar con ellos en MATLAB:

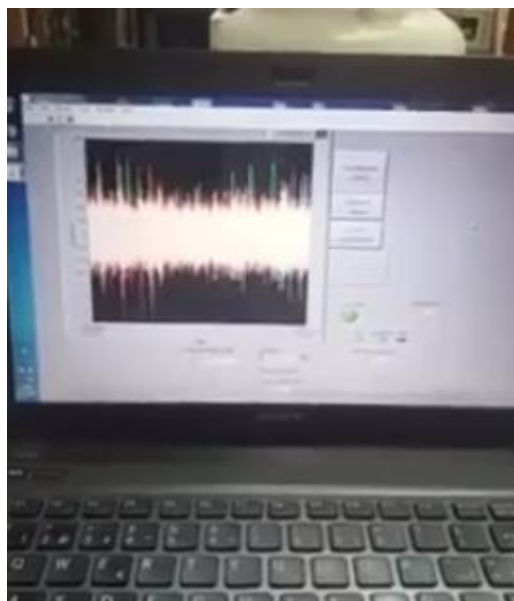


Fig. 13: Funcionamiento del programa Labview de toma de datos

### 3.2 ESTUDIO DE GRANULOMETRÍA

Las partículas Ballotini son usadas en multitud de aplicaciones, especialmente en los tratamientos de superficie en metales, debido a que están hechas de vidrio, son químicamente inertes, y la facilidad de su operación las hace versátiles para diferentes tratamientos. Las empresas fabricantes, comercializan las partículas en contenedores agrupadas en rango de diámetros.

Debido a que cabía la posibilidad de que el producto tuviera una granulometría diferente a la indicada se usaron varios tamices y posteriormente se pesaron las diferentes capas que resultaron para determinar los porcentajes reales.



*Fig. 14: Tamizado*

Los datos obtenidos fueron similares en ambos:

|                  | Inferior al mínimo | Entre el mínimo y el máximo | Superior al máximo |
|------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| 150-250 $\mu$ m: | 3%                 | 97%                         | 0%                 |
| 600-800 $\mu$ m: | 3%                 | 97%                         | 0%                 |

Los pequeños porcentajes de partículas por debajo del mínimo nominal se pueden explicar por posibles roturas en el transporte o por irregularidades en el tamiz, esta desviación no crea ninguna perturbación en los experimentos.

El lecho fluidizado se usó con diferentes mezclas para dar una visión más amplia de variedades de granulometría en las partículas del lecho, se probaron un total de 5 mezclas: se inició con un 100% de partículas gruesas y este porcentaje se redujo en un 25% aumentando el de partículas finas hasta llegar a un 100% de partículas finas.

Para conocer la composición en masa con exactitud se usaba una balanza y teniendo en cuenta que todos los ensayos se realizaban con 500g en total se multiplicaban los porcentajes deseados en la mezcla por el peso total y se vertían partículas de los contenedores en un matraz para luego verter la mezcla en el lecho, de este modo se dispuso de cinco mezclas:

|          | % Gruesas   | % Finas     |
|----------|-------------|-------------|
| Mezcla 1 | 100% - 500g | 0% - 0g     |
| Mezcla 2 | 75% - 375g  | 25% - 125g  |
| Mezcla 3 | 50% - 250g  | 50% - 250g  |
| Mezcla 4 | 25% - 125g  | 75% - 375g  |
| Mezcla 5 | 0% - 0g     | 100% - 500g |

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Una vez con la mezcla dentro del lecho, el sistema de ensayos seguía un orden ascendente-descendente escalonado hasta 300 litros por minuto (l/min) en el caso de 100% partículas grandes y 200 l/min en el resto, esta diferencia de límite es debido a que como se ha comentado antes la velocidad de transporte neumático se alcanza para las partículas finas a partir de un flujo de 200 l/min. Se partía del reposo y se incrementaba sucesivamente en 20 hasta 200 o 300 l/min para después disminuir hasta 0. El programa permitía la toma de datos durante un tiempo determinado por el usuario, y para eliminar la influencia de efectos como el golpe de la puerta cercana a la instalación se tomó 4 minutos por prueba.

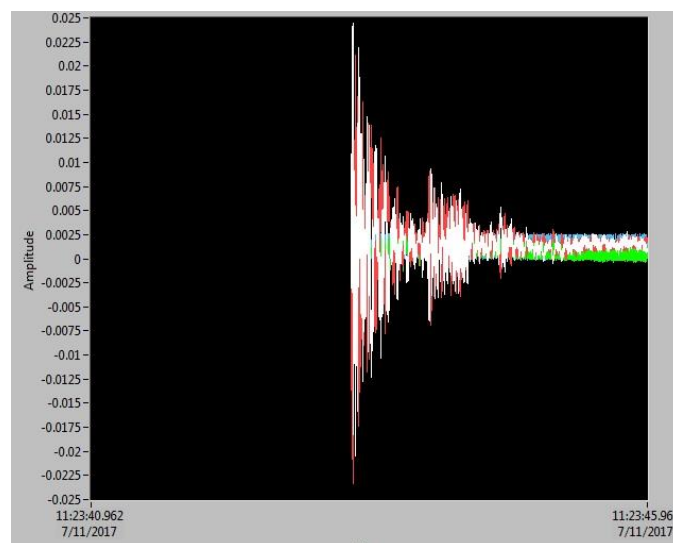


Fig. 15: Efecto del golpe de la puerta en Labview

Este procedimiento se llevó a cabo durante tres ciclos de subida-bajada dando así 6 pruebas para cada situación de misma composición, mismo caudal, luego se disponen de 24 minutos por configuración eliminando cualquier perturbación externa o efectos secundarios como la electricidad estática inducida por la vibración de las partículas:

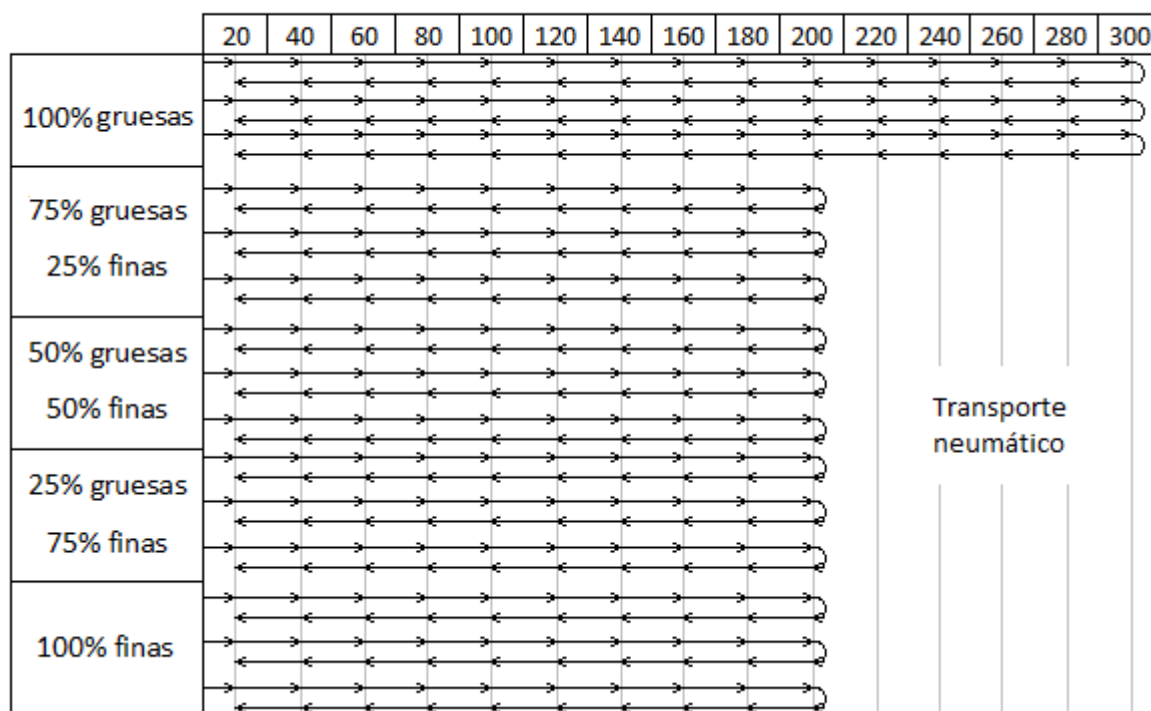


Fig. 16: Esquema del procedimiento de experimentos

Por lo tanto, se ensayaron 5 tipos de mezclas, 6 veces por composición, 15 caudales en un caso y 10 en el resto para evitar el transporte neumático que ocurría a más de 200 l/min en las partículas finas, durante 4 minutos por ensayo dando un total de 22 horas.

## TRATAMIENTO DE SEÑALES



#### 4.1 TEOREMA DE NYQUIST

El teorema de Nyquist-Shannon enuncia que la reconstrucción de una señal continua y periódica a partir de muestras de ésta es posible si la frecuencia de muestreo es como mínimo el doble del ancho de banda de la señal.

Este teorema es de especial utilidad en la medida de la señal producida por los sensores, ya que con una aproximación a priori del ancho de banda que van a tener las señales, se puede calcular la frecuencia de muestreo que debe realizar el programa Labview.

Para una mayor seguridad en cumplir la condición de poder reconstruir la señal en un archivo derivada de este teorema, se estima un ancho de banda máximo de 5.000Hz, como se verá en la práctica éste es mucho menor por lo que se puede asegurar que el muestreo y posterior reproducción de la señal es posible con la frecuencia usada en Labview de 10.000Hz.

## 4.2 DESVIACIÓN TÍPICA

La desviación típica es una herramienta matemática, que da un valor de la dispersión de un grupo de datos, en relación con su valor medio para conocer con una mayor contextualización de cómo varía la señal respecto de sí misma.

Los datos de los cuales se extrajo la desviación típica son los de las señales recopiladas, por lo tanto, es una distribución continua y  $\sigma$  se calcula como la raíz cuadrada de la varianza:

$$\sigma = \sqrt{\int (x - \mu)^2 f(x) dx}$$

Los sensores que se dispusieron eran diferenciales, sólo medían incrementos, lo que es de gran utilidad en un lecho ya que con estos incrementos se puede calcular la desviación típica de la presión o la acelerometría y conocer el grado de agitación del lecho ya que la desviación media aplicada a este dispositivo significa la cantidad de variación de la presión y aceleración, o vibración, que se produce en el interior, a mayor desviación media mayor agitación que es producida por un estado de fluidización más rápido.

Éste dato permite comparar para la misma composición, las desviaciones medias causadas por diferentes flujos, y ponerlas en comparación al resto para la misma mezcla. Debido a que un lecho no fluidizado apenas tiene desviación típica y en uno fluidizado aumenta con el incremento de caudal, se pueden graficar los resultados obtenidos a modo de histograma como desviación típica vs velocidad de flujo y por interpolación de la zona fluidizada obtener el punto de corte con el eje de las velocidades, averiguando así la velocidad de mínima fluidización  $V_{mf}$ . Conviene señalar que cómo se han realizado 6 pruebas bajo las mismas condiciones se dispondrán de 6 desviaciones típicas diferentes para las mismas composiciones y velocidades, luego al graficarlo el resultado no será un punto sino un diagrama de caja o *boxplot*, resultando en una representación de la sucesión de éstos en los que se puede apreciar la tendencia.

Un Boxplot es una herramienta para la representación estadística de una distribución. Se representa como un rectángulo en el que el valor superior es el del tercer cuartil Q3 (75% de los datos) y el inferior es el primer cuartil Q1 (25% de los datos), teniendo así el 50% de los datos dentro de la caja, en la que se representa la mediana como una línea que divide esta caja. Para representar los valores a partir de los cuales se tomarán como atípicos, si existen, el resto de valores que caigan en esa zona, se pueden tomar diferentes criterios, en este caso se toma el criterio estándar de MATLAB de la distancia intercuartílica.

### 4.3 DENSIDAD ESPECTRAL-PERIODOGRAMA

Toda señal está compuesta por una o más frecuencias, que forman su espectro. Para estudiar la composición espectral de una señal, se emplea la función matemática de la densidad espectral, una representación lineal e invariante en el tiempo de la energía o potencia de las frecuencias que componen la dicha señal, de este modo se pueden hallar periodicidades ocultas en sistemas físicos, identificando las frecuencias con más energía o potencia de la señal, objetivo primordial en este trabajo.

Ya que el comportamiento del lecho tiene naturaleza estocástica, la PSD no se puede hallar con exactitud si no es con una toma de datos infinita, por lo que se calculará con una estimación; de tipo no paramétrico, por lo que esencialmente será el cálculo del periodograma.

El método de estimación es el llamado método de Welch, en el que se hacen periodogramas a toda la señal en pequeñas divisiones, que se toman superpuestas para mayor exactitud, es decir la suma de las divisiones es mayor al tiempo total de la señal, para luego con la transformada de Fourier discreta de cada división calcular una media entre las gráficas resultantes, dando lugar a una gráfica estimada del periodograma de la señal.

Esto permite pasar del dominio del tiempo, como es el caso en las pruebas realizadas, al dominio de la frecuencia, siendo posible averiguar la frecuencia característica de un tipo de partículas o del otro y con las PSD de las mezclas averiguar si existe algún tipo de correlación entre las frecuencias características de una cierta mezcla y su composición sabiendo las frecuencias características de sus componentes.

## RESULTADOS

## 5.1 BOXPLOT DE LOS FLUJOS

Como introducido previamente, para interpretar el estado de fluidización de las mezclas binarias bajo diferentes caudales de aire se hicieron boxplot de las desviaciones medias de las señales, puesto que un aumento sustancial indica fluidización.

Los resultados permiten aproximar el flujo (y por lo tanto la velocidad mínima de fluidización) al que la mezcla se fluidiza viendo la tendencia creciente y el punto en el que se inicia:

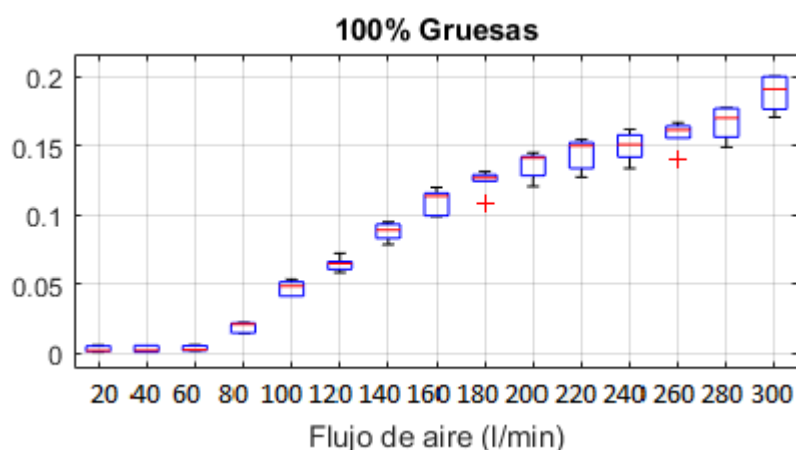


Fig. 17: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 100% partículas gruesas

En la primera figura se puede apreciar cómo se inicia la fluidización a caudales cercanos a 80 l/min y cómo antes de esto, la desviación estándar es prácticamente nula.

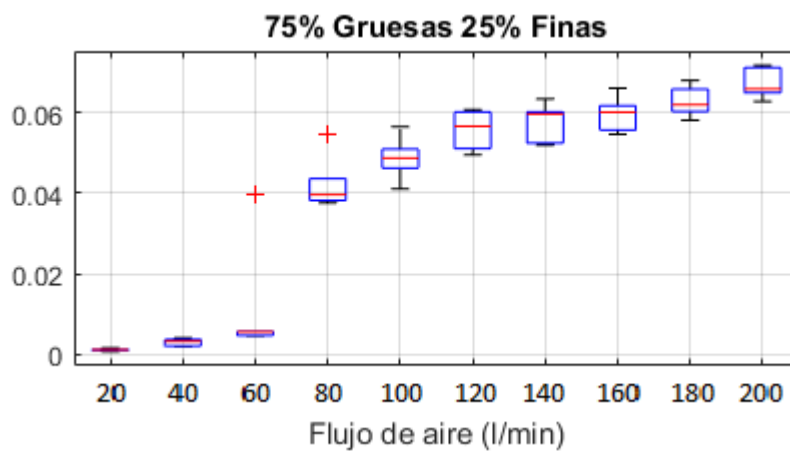


Fig. 18: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 75% partículas gruesas y 25% finas

En esta comparación se puede apreciar con mayor claridad el incremento brusco en la desviación estándar.

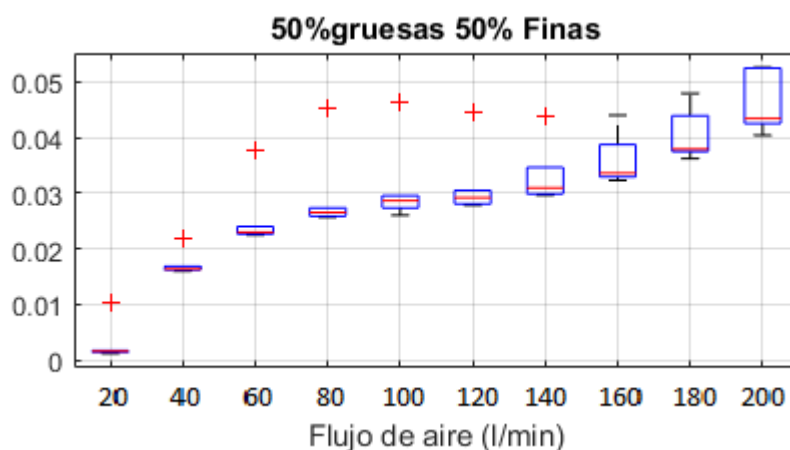


Fig. 19: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 50% partículas gruesas y 50% finas

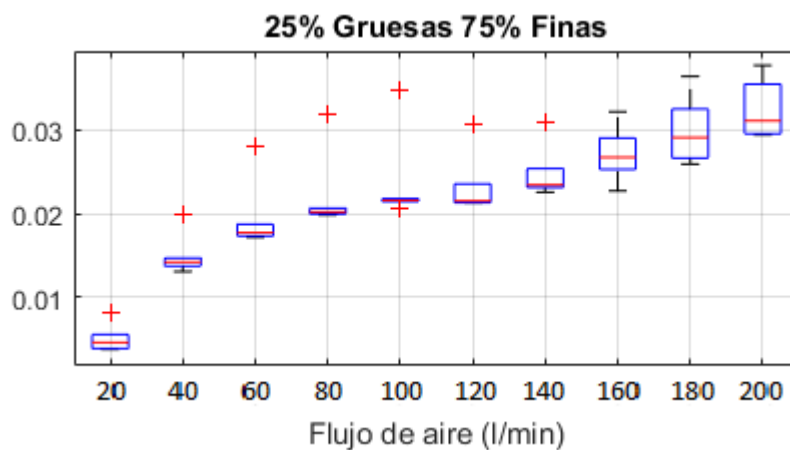


Fig. 20: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 50% partículas gruesas y 50% finas

En estos dos casos se puede ver cómo hay un incremento de datos atípicos o outliers por la parte alta de los boxplots, es decir que hay variaciones típicas estadísticamente altas de forma brusca, esto se debe a la gran diferencia del estado de fluidización de las partículas dependiendo de su granulometría.

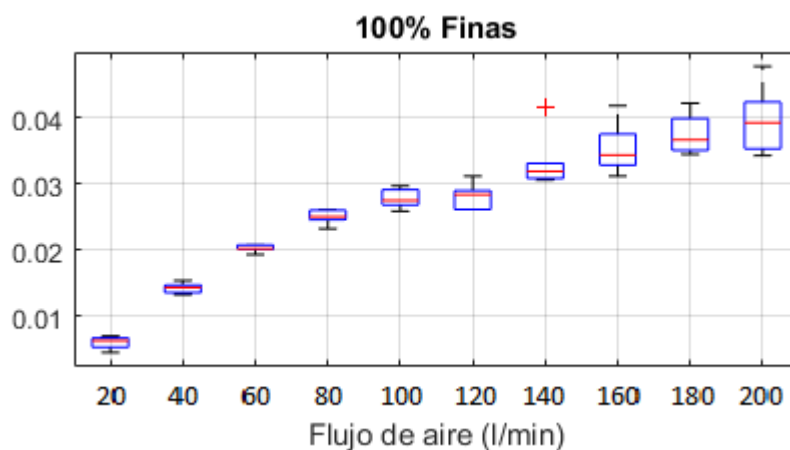


Fig. 21: Boxplots de las desviaciones típicas en los ensayos con 100% partículas finas

En esta gráfica se puede apreciar cómo a con un 100% de partículas finas la fluidización ocurre desde prácticamente el inicio.



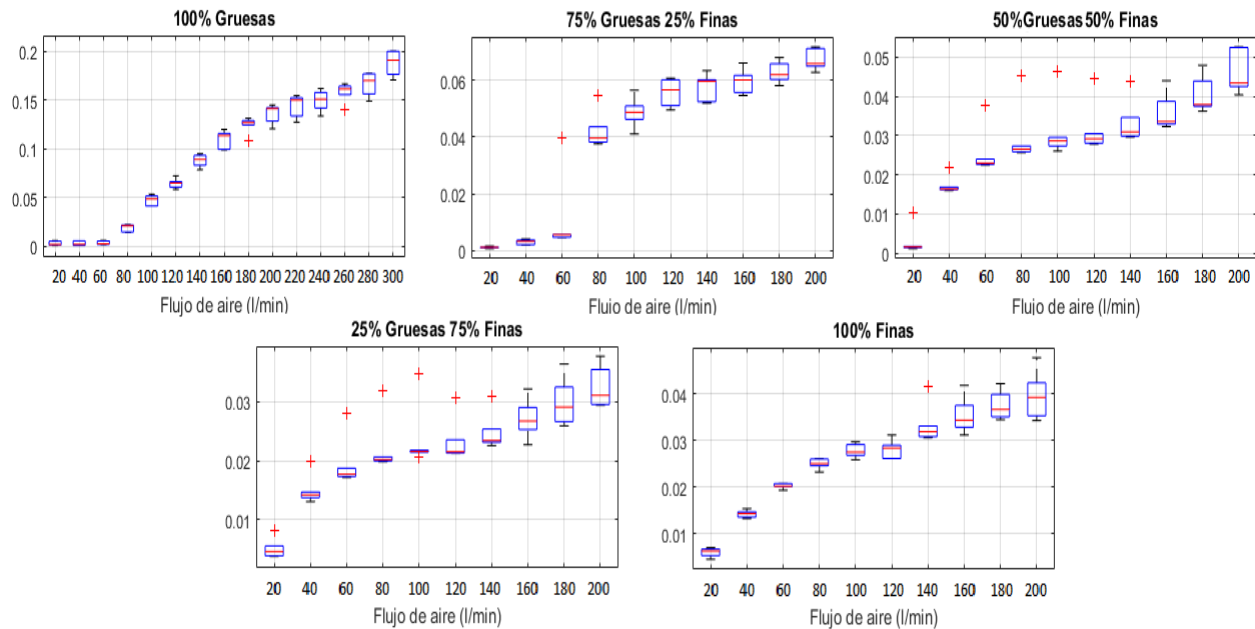


Fig. 22: Comparativa de Boxplots

Haciendo la comparación de las 5 composiciones se puede apreciar cómo incrementar el porcentaje de finos hace disminuir la velocidad de mínima fluidización.

## 5.2 PSD DE PRESIONES

Como se ha explicado, las PSD indicarán si hay una frecuencia oculta en los cambios de presión producidos por las oscilaciones del lecho. Además, indicarán el estado de fluidización y, comparando las potencias correspondientes a cada gráfica se podrá observar cual está más fluidizada. Esta información debería ser coherente con la de los boxplots, a menor porcentaje de partículas gruesas, mayor fluidización.

Como se puede observar en los boxplots del punto anterior, hay diferentes regímenes según la proporción de mezcla bajo el mismo caudal. Para una caracterización lo más amplia posible, se realizarán las PSD de tres caudales que ilustran los diferentes estados:

-40 l/min: las mezclas de 100% gruesas y 75% gruesas no están fluidizadas, las restantes en fluidización incipiente.

-100l/min: las mezclas de 100% gruesas y 75% gruesas se encuentran en fluidización incipiente, el resto completamente fluidizadas.

-200l/min: todas las mezclas están completamente fluidizadas.

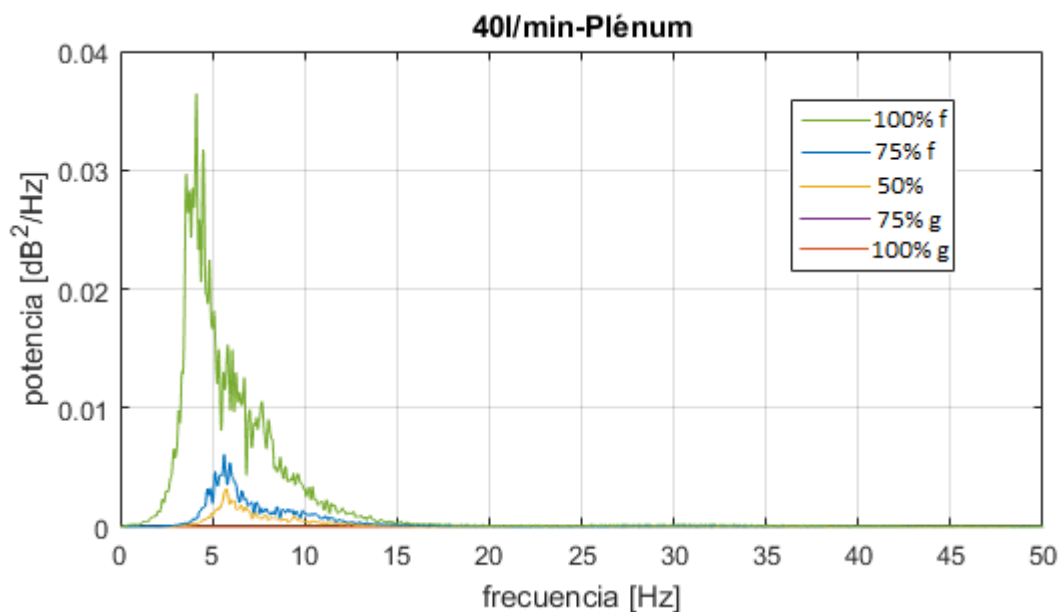


Fig. 23: Comparativa de PSD de presiones a 40l/min en el plénum

En esta gráfica se puede observar claramente que a 40l/min los resultados concuerdan con los boxplots, la mezcla de 100% finas, 75% finas y 25% gruesas, y 50% finas y 50% gruesas están fluidizadas mientras que el resto no, ya que el tamaño de las partículas es demasiado grande y no se alcanza la velocidad mínima de fluidización.

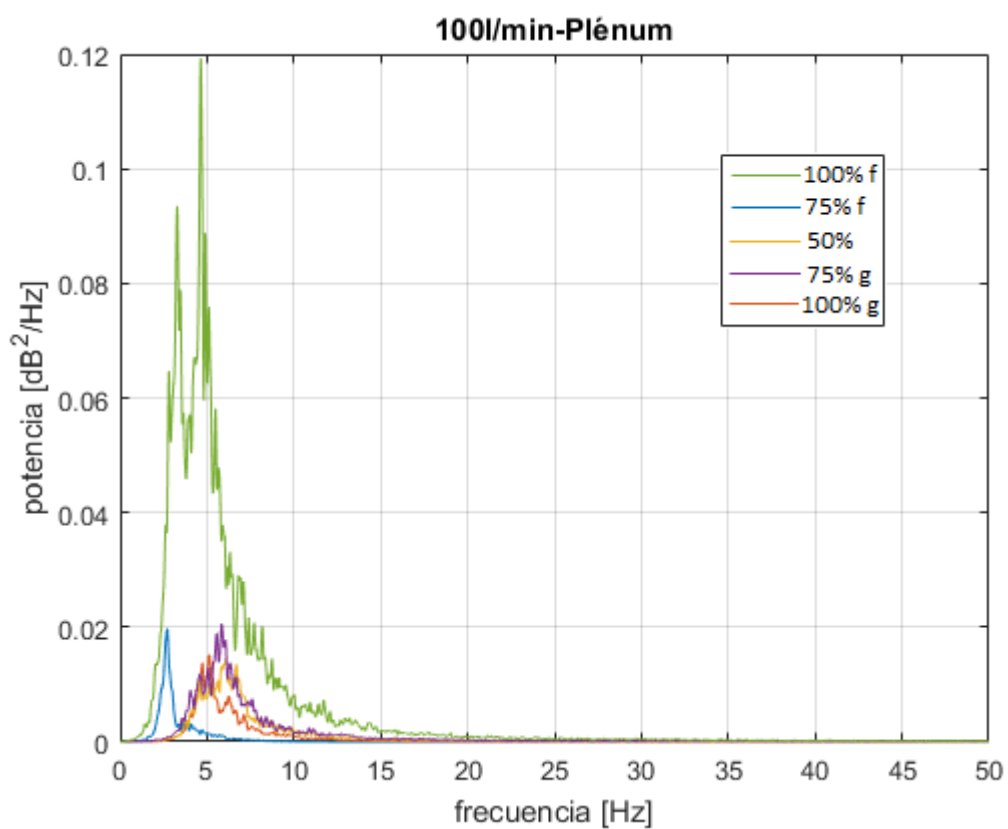


Fig. 24: Comparativa de PSD de presiones a 100l/min en el plenum

En esta imagen se comprueba el cambio de régimen de las dos mezclas con mayor porcentaje de partículas gruesas, ya que se puede apreciar sus gráficas de densidad espectral de potencia, lo que significa que hay una vibración.

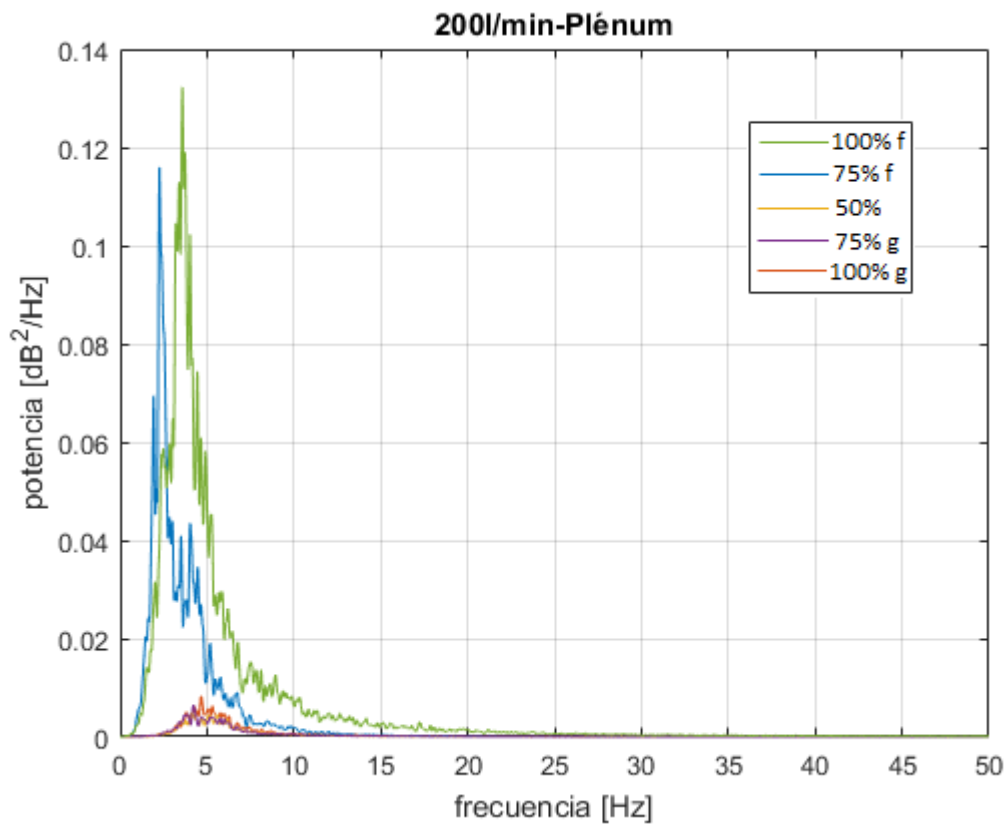


Fig. 25: Comparativa de PSD de presiones a 200l/min en el plénium

En esta gráfica se puede apreciar cómo las dos mezclas con granulometría más fina se han fluidizado más (de hecho, con la de 100% finas a 200l/min se rozaba el transporte neumático), por lo tanto, la potencia de su frecuencia de vibración es mucho mayor.

Tal y cómo se comentó anteriormente las medidas en el lecho son menores en magnitud comparadas con las del plénium, pero siguen el mismo patrón comentado anteriormente.

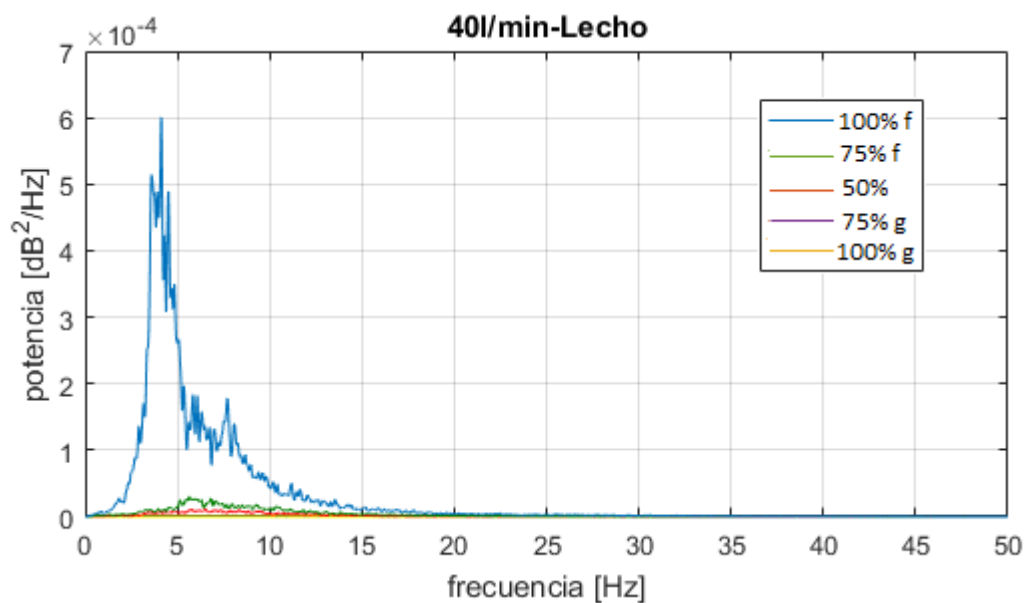


Fig. 26: Comparativa de PSD de presiones a 40l/min en el lecho

Una vez más, las dos señales más pesadas no muestran densidad espectral relevante al no ser capaz el flujo de fluidizarlas

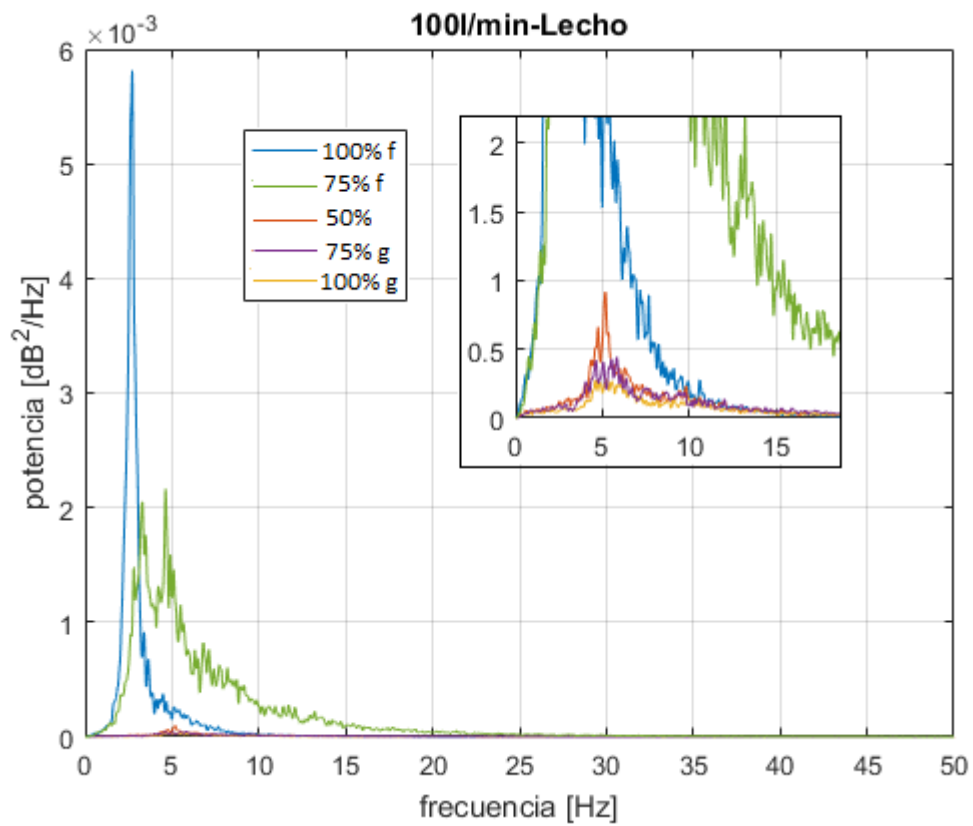


Fig. 27: Comparativa de PSD de presiones a 200l/min en el lecho

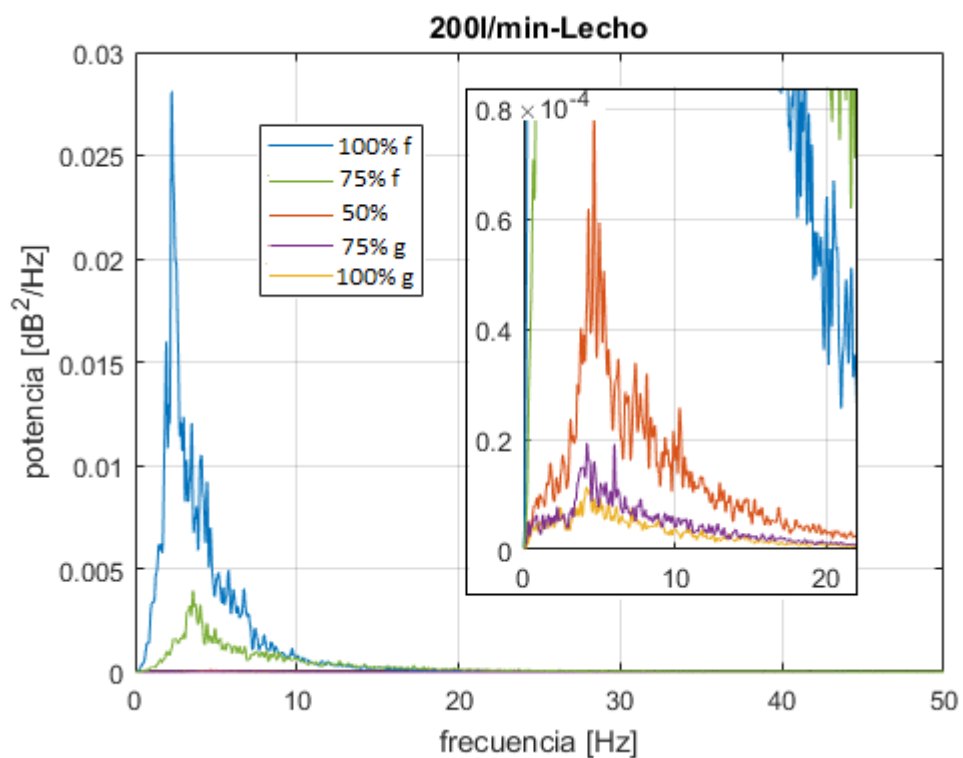


Fig. 28: Comparativa de PSD de presiones a 200l/min en el lecho

En estas dos figuras se puede comprobar la constancia de la tendencia.



### 5.3 PSD DE ACELEROMETRÍA

La medida de la acelerometría debe ser diferente de la de la presión puesto que la oscilación del valor manométrico no tiene ninguna relación con la vibración de las partículas.

En el cálculo de la PSD de las señales de acelerometría es importante señalar que la variación de la señal es muy grande conviene calcular la transformada de Hilbert en valor absoluto.

La transformada de Hilbert es un operador real que para este tipo de señales calcula la envolvente de la señal, en este caso se toman los valores absolutos para que todos los puntos sean siempre positivos.

Además, como se puede ver en este ejemplo a velocidad máxima para que el efecto se pueda apreciar mejor:

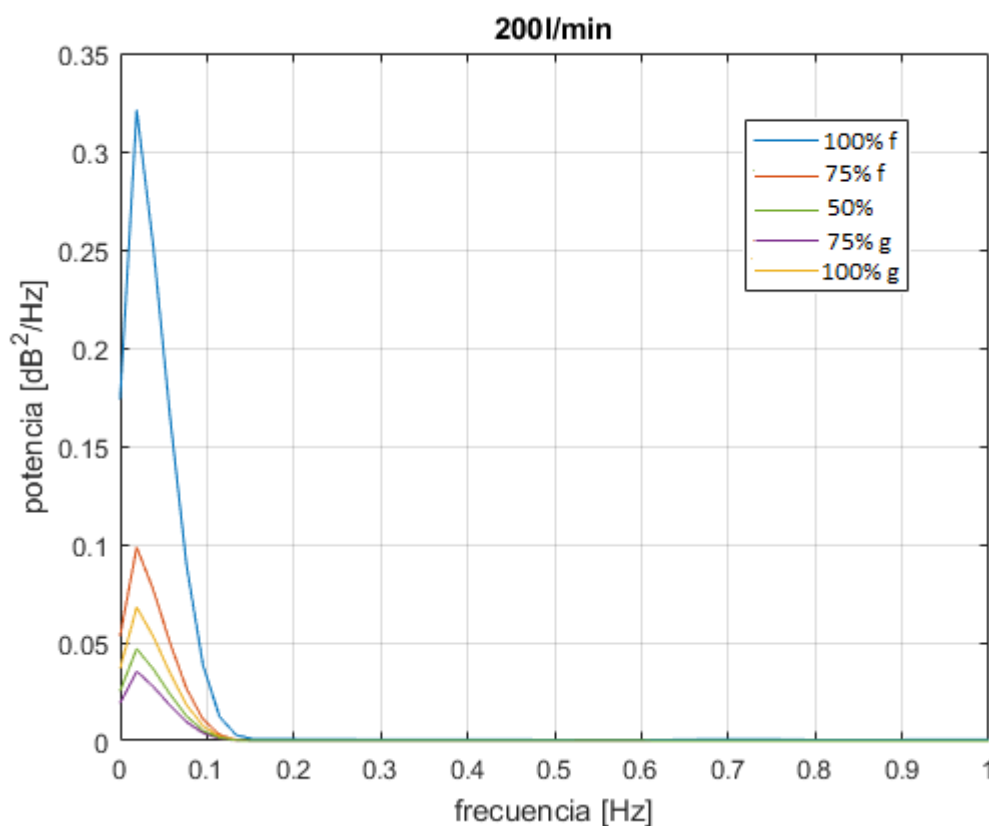


Fig. 29: Efecto de la vibración de la estructura en las PSD de acelerometría

Parece que hay una frecuencia clara y dominante para todas las señales cambiando sólo en potencia. En realidad, la hay, pero no es de importancia a la hora de caracterizar la mezcla puesto que esta frecuencia es la que tiene la vibración del lecho, entendido como el dispositivo de plástico anclado a la pared, no la mezcla interna de partículas.

Para evitar esta perturbación en los resultados, se implementó en MATLAB un filtro de paso alto de 0,16 Hz puesto que es la frecuencia hasta donde llega esta perturbación, por ello, en los resultados siguientes se pueden apreciar las PSD correctas de la mezcla en el interior del lecho.

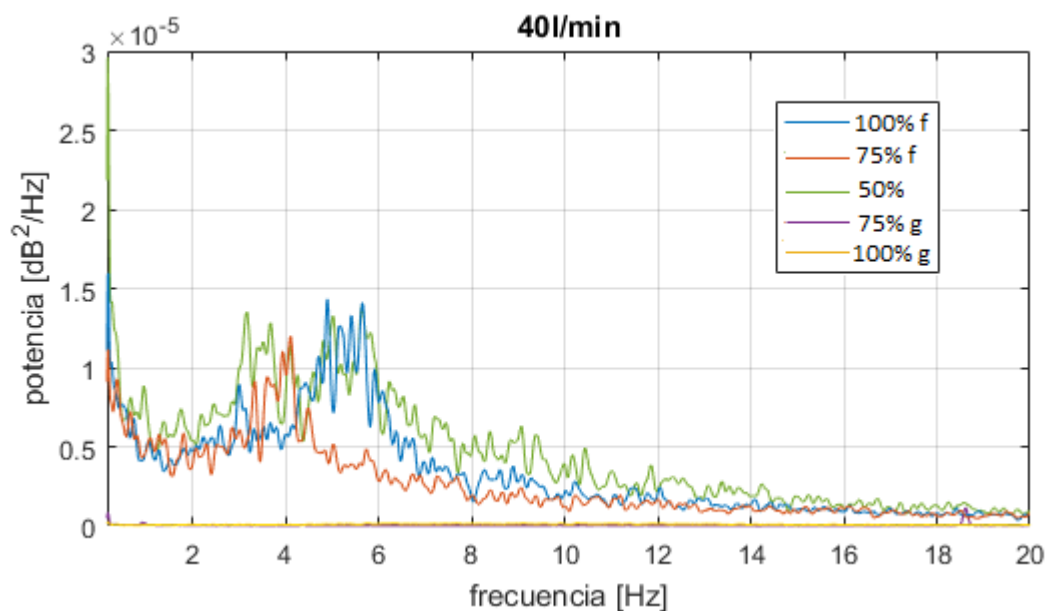


Fig. 30: Comparativa de PSD de acelerometría a 40l/min

Una vez más, se aprecia cómo no hay vibración aparente en las señales de las mezclas más gruesas, ya que no están fluidizadas.

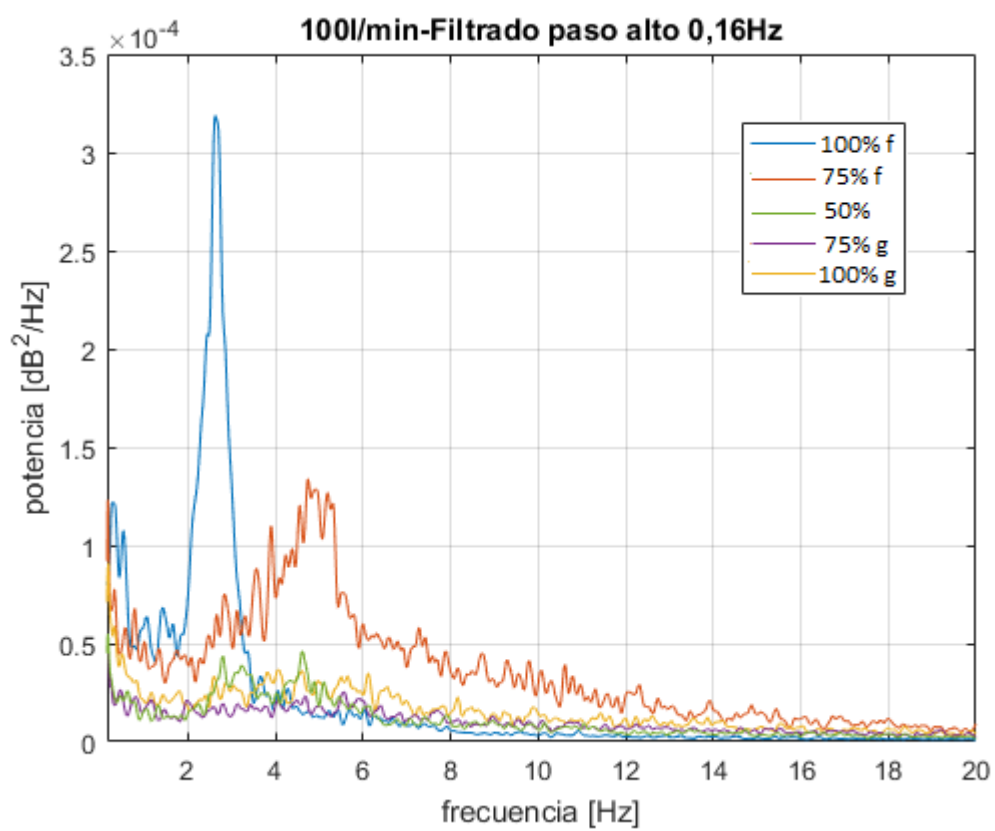


Fig. 31: Comparativa de PSD de acelerometría a 100l/min

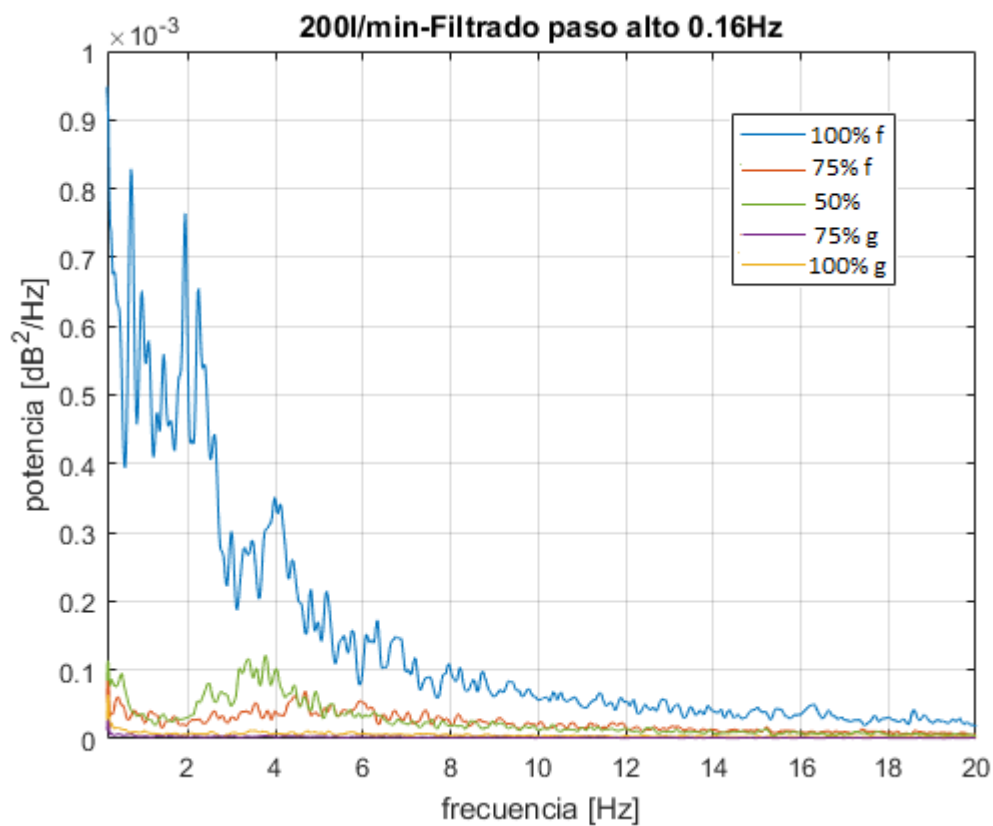


Fig. 32: Comparativa de PSD de acelerometría a 200l/min

En estas dos gráficas se puede apreciar cómo a medida que se incrementa el flujo, aumenta el grado de fluidización y por ello las lecturas de acelerometría de los sensores.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se pretendía llevar a cabo una caracterización de mezclas binarias de partículas dentro de un lecho fluidizado, en diferentes composiciones y flujos volumétricos de aire.

En primer lugar, se puede afirmar que la caracterización ha sido concluyente, se han podido extraer gráficos que aportan valores precisos que posibilita conocer el carácter del lecho, conocer los puntos críticos de cambio de comportamiento y extraer de una señal la frecuencia dominante con la que varía la presión interna o la vibración del lecho

Se ha comprobado que el método usado, el uso de sensores externos al lecho y posterior tratamiento para obtener diagramas de caja y gráficos de densidad espectral, es un método acertado, puesto que los resultados son fiables al coincidir entre ellos a la hora de dar los puntos en los que el estado de fluidización sufre cambios, además de medir la magnitud de estos cambios y poder poner en comparación diferentes tipos de mezcla al mismo caudal de la misma forma que se pueden los efectos en el mismo tipo de forma de diversos caudales.

En cuanto al comportamiento en sí, se puede concluir que los lechos que no están fluidizados no sufren variaciones en su presión o vibraciones perceptibles. Una vez fluidizados se puede observar que estas variaciones o vibraciones no son en absoluto caóticas, sino que siguen una frecuencia clara y calculable, además, esta frecuencia tendrá más potencia cuanto mayor sea el grado de fluidización y, consecuentemente, el flujo o velocidad del fluido que atraviesa el lecho.

Sobre asociar una frecuencia a una cierta composición, si bien se puede apreciar que la frecuencia dominante cambia según cambia la mezcla, no se puede determinar con precisión la relación que guardan estos dos datos ya que el estado de fluidización de las mezclas más gruesas hacía difícil encontrar un valor determinante.

## BIBLIOGRAFÍA

- Kunii, D., Levenspiel, O. (1991). Fluidization Engineering. Stoneham: ButterworthHeinemann
- De Martín, L., Villa Briongos, J., Aragón, J.M., Palancar, M.C. (2010). Can low frequency accelerometry replace pressure measurements for monitoring gas-solid fluidized beds? Chemical Engineering Science.
- De Martín, L., Villa Briongos, J., García-Hernando, N., Aragón, J.M. (2010). Detecting regime transitions in gas-solid fluidized beds from low frequency accelerometry signals. Powder Technology.
- Nienow A Quantitative Analysis of the Mixing of Two Segregating Powders of Different Density in a Gas-Fluidised Bed.
- A. W. Nienow, P. N. Rowe, L.Y.-L. Cheung (1978) Segregation by size difference in gas fluidized beds.
- S.Y. Wu, J. Baeyens (1998). Segregation by size difference in gas fluidized beds. Powder technology.
- Gómez Hernández J., Soria-Verdugo A., Santana D. (2012) Fluidized bed with a rotating distributor operated under defluidization conditions. Chemical engineering journal